

Diseño y evaluación de un cojinete de deslizamiento para recuperación de equipos en la industria minero-metalúrgica

Desing and evaluation of a sliding bearing for equipment restoration in metallurgical industry

Benigno Leyva-De la Cruz¹, Eli Efraín Guzmán-Romero¹, Marcelo Fabián Salazar-Corrales²; Héctor Luis Laurencio-Alfonso³; William Giovanny Quitiaquez-Sarzosa⁴; Yoalbys Retirado-Mediaceja^{1*}

¹Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

²Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.

³Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

⁴Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

*Autor para la correspondencia: yretirado@ismm.edu.cu

Resumen

El estudio abordó el diseño, fabricación y evaluación de un cojinete de deslizamiento (buje) destinado a la restauración de equipos auxiliares críticos utilizados en las tareas de mantenimiento de la industria minero-metalúrgica del níquel. Se priorizó la fiabilidad y durabilidad del componente mediante un análisis tribológico y metalúrgico, enfocándose en el régimen de operación caracterizado por la carga radial (374,011 N), la velocidad de rotación (2 800 r/min) y la temperatura de servicio (60 °C). Tras la caracterización del material de bronce desgastado original (CuAl10Ni), se seleccionó el bronce al estaño fosforoso (CuSn14), verificando su dureza superior (232 HB) para garantizar una mayor resistencia al desgaste. El diseño incluyó cálculos de holgura y carga específica, empleando el número de *Sommerfeld* para asegurar la operación bajo un régimen de lubricación elastohidrodinámica (EHL) con aceite ISO VG 460 a 60 °C. La fabricación se ejecutó en un torno 16k20, logrando una rugosidad superficial que se ajustó a las especificaciones de diseño con un error relativo del 10 %. Los resultados técnicos son prometedores: el diseño garantiza el régimen EHL, proyectando una vida útil estimada de 1 348 000 horas. Este buje optimizado asegura la operatividad de equipos imprescindibles, mitigando costosos tiempos de inactividad en procesos clave de la cadena de valor del níquel.

Palabras clave: análisis tribológico, bronce fosforoso, cojinete de deslizamiento, lubricación elastohidrodinámica

Abstract

The study presents the design, manufacture and evaluation of a plain bearing (bushing) intended for the restoration of critical auxiliary equipment used in the nickel mining and metallurgical operations. Reliability and durability of the component was prioritized through a tribological and metallurgical analysis, focusing on the operation regime characterized by radial load of 374,011 N, rotation speed of 2 800 r/min) and service temperature of 60°C. The worn bronze material originally used (CuAl10Ni) was characterized, and phosphorous tin bronze (CuSn14) was selected as a replacement due to its superior hardness (232 HB), ensuring enhanced wear resistance. The design process included clearance and specific load calculations, applying the Sommerfeld number to confirm operation under an elastohydrodynamic (EHL) lubrication regime with ISO VG 460 oil at 60 °C. Manufacturing was carried out on a 16k20 lathe, achieving the required surface roughness with a relative error of 10 %. Technical evaluation indicates that the design guarantees stable EHL lubrication and projects an estimated service life of 1,348,000 hours. This optimized bushing improves the reliability of essential equipment, reducing costly downtime and supporting continuity in key processes of the nickel value chain.

Keywords: tribological analysis, phosphorous bronze, sliding bearing, elastohydrodynamic lubrication

1. INTRODUCCIÓN

Los cojinetes de deslizamiento, o bujes, son elementos cruciales en la ingeniería mecánica moderna, esenciales para soportar cargas, minimizar la fricción y reducir el ruido en equipos rotativos (García *et al.*, 2022; Jacobs y Baszenski, 2024). En el contexto estratégico de la industria minero-metalúrgica del níquel, la operatividad ininterrumpida de la maquinaria es vital. Por ello, la restauración y el mantenimiento de equipos son fundamentales para generar ahorros, reducir tiempos de inactividad, y optimizar procesos productivos (García *et al.*, 2023; Kofi *et al.*, 2023; García *et al.*, 2024). Este enfoque se alinea directamente con los objetivos de sostenibilidad al extender la vida útil de los activos (Rising *et al.*, 2022; Carrión *et al.*, 2024).

La aplicación de cojinetes de deslizamiento no se limita a herramientas o dispositivos auxiliares; son componentes fundamentales en la maquinaria pesada y crítica del sector. Estos elementos son vitales en sistemas que

operan bajo condiciones extremas de carga y temperatura, encontrando aplicación en: bombas de pulpa, transportadores de mineral, reductores de velocidad, secadores rotatorios, molinos de bolas, y en los mecanismos de alineación y soporte de hornos de procesamiento.

La indisponibilidad de cualquier equipo que dependa de un buje puede detener o retrasar significativamente la producción. Por lo tanto, la fiabilidad del cojinete es un factor determinante en la continuidad operativa.

Si bien el cojinete de deslizamiento es una solución ampliamente utilizada, el entorno de trabajo en la metalurgia del níquel -caracterizado por alta corrosión, humedad, abrasión y cargas dinámicas- exige un análisis específico y riguroso. Un diseño genérico es insuficiente y puede llevar a fallos catastróficos. Por consiguiente, la selección de materiales (bronces específicos) y la optimización del régimen de lubricación deben ajustarse estrictamente a los parámetros reales de operación (carga, velocidad, temperatura y entorno químico).

Estos cojinetes operan idealmente mediante lubricación hidrodinámica o hidrostática, donde una película de lubricante separa las superficies, ofreciendo baja fricción, alta precisión y estabilidad (Michalec *et al.*, 2021; Harishkumar *et al.*, 2023). Sin embargo, su eficacia requiere alta precisión en la fabricación y optimización del diseño (Michalec *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025). El desgaste es una causa de fallo común y costosa, representando una fracción significativa del costo total de producción (Ramírez, 2023; Jacobs y Baszenski, 2024).

La fabricación y el diseño optimizado de un buje especializado aseguran la disponibilidad de equipos clave, ya sean principales o auxiliares. El desarrollo de un cojinete de deslizamiento especializado, aplicado a la restauración de cualquier activo crítico, resuelve la indisponibilidad de componentes imprescindibles para los procesos minero-metalúrgicos, justificando plenamente la inversión en su diseño y fabricación.

La fabricación precisa y el riguroso control de calidad son indispensables para que componentes críticos como los bujes cumplan con las especificaciones (García *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025). Se requiere un enfoque sistemático que incluya la selección adecuada de materiales y lubricantes, control dimensional riguroso y la aplicación de modelos de desgaste validados (Lehmann *et al.*, 2023; García *et al.*, 2023; Dimitri *et al.*, 2025). La manufactura se beneficia de los principios *Lean* (Kofi *et al.*, 2023; Santos, 2025), aunque el mecanizado de materiales avanzados presenta desafíos como el desgaste de la herramienta y el impacto en la integridad superficial (Kumar, 2022; Prasad *et al.*, 2022). Además, la fabricación aditiva

(SLA) ofrece una solución para piezas a medida, pero sus propiedades de dureza y desgaste deben ser evaluadas (Muñoz *et al.*, 2024).

En el contexto de la restauración de equipos críticos, la fabricación, control y evaluación de un buje de reemplazo es de vital importancia (García *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025). Un buje bien diseñado restaura el rendimiento original, minimiza el desgaste y prolonga la vida útil (Harishkumar *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025). Este trabajo busca fomentar soluciones locales y la autosuficiencia tecnológica (García *et al.*, 2024), ya que la calidad del cojinete de deslizamiento es determinante para la durabilidad a largo plazo del equipo (García *et al.*, 2023; Jacobs y Baszenski, 2024).

El objetivo del presente artículo es caracterizar el proceso de fabricación, el control de calidad implementado y la evaluación de un cojinete de deslizamiento fabricado para la restauración de equipos críticos, asegurando fiabilidad y durabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características del cojinete de deslizamiento

El cojinete de deslizamiento objeto de estudio (Figura 1) es un componente cilíndrico fabricado en una aleación de bronce de alto rendimiento, específicamente seleccionada por su superior resistencia al desgaste, fatiga superficial y capacidad para operar bajo cargas elevadas. Su diseño geométrico y el control riguroso del acabado superficial fueron optimizados para garantizar la operación en un régimen de lubricación elastohidrodinámica (EHL), maximizando la fiabilidad y prolongando significativamente la vida útil del equipo.



Figura 1. Cojinete de deslizamiento.

2.2. Instrumentos de medición utilizados

Para el desarrollo de las mediciones se emplearon los siguientes instrumentos: pié de rey universal con una precisión de 0,02 mm (rango 0-150 mm); durómetro portátil TH170, que mide en las escalas *Rockwell B* y *C*, *Vickers*, *Brinell*, *Shore* y *Leeb*, con precisión de $\pm 8\%$, utilizado para medir la dureza superficial del buje y el eje; micrómetro de exteriores con precisión de 0,01 mm (rango 0-25 mm), empleado para medir diámetros; rugosímetro TR200, para evaluar la rugosidad superficial Ra (rango 0,01 m - 40 m) con precisión de $\leq \pm 10\%$; y un Espectrolab 230, para determinar la composición química del material del cojinete de deslizamiento, con desviaciones estándar relativas inferiores al 5 % para elementos mayoritarios y entre 5 % y 10 % para elementos trazas.

2.3. Torno y herramientas utilizadas

Se utilizó un torno 16k20 que posee número de revoluciones de 12,5 r/min a 1 600 r/min; avance longitudinal 0,05 mm/r a 2,8 mm/r y avance transversal 0,025 mm/r a 1,4 mm/r. Las herramientas específicas fueron: para torneado exterior, cuchilla CCMT 09 T3 - 04 WF 3005 con soporte SCLCR/L 1212F09 - M; taladrado, broca de 7 mm, R415.5 - 0690 - 30.8C0 1040; trozado, cuchilla N123F2 - 0250 - 0001 - CF 4025 con soporte LF123F10 - 1616B (Sandvik, 2000).

2.4. Parámetros de operación del cojinete de deslizamiento

Se determinaron las revoluciones, la carga y la temperatura de operación. La fuerza radial (Ay) que actúa sobre el cojinete (Figura 2) se calcula mediante la ecuación 1, aplicando el equilibrio de momentos flectores en el punto B (Rodríguez, 2025).

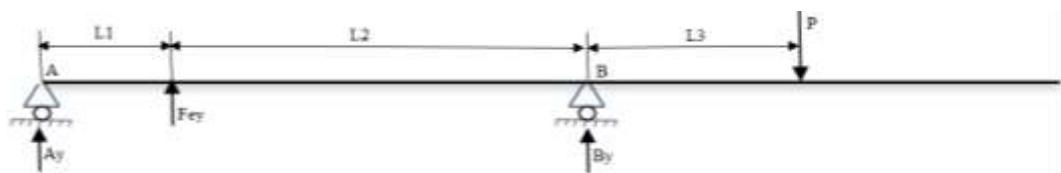


Figura 2. Esquema de las fuerzas que actúan en el sistema (viga).

$$Ay = \frac{P \cdot L3 + Fey \cdot L2}{L1 + L2} \quad (1)$$

Donde: Ay , es la fuerza radial que actúa sobre el buje (N); P es el peso total, incluye al árbol, la rueda dentada y el mandril (N); $L3$, distancia desde el punto B al centro de masa (mm); Fey , fuerza radial de la transmisión

cilíndrica helicoidal (N); L_2 , distancia del punto de aplicación de la fuerza radial (F_{ey}) al punto B en mm; L_1 , distancia desde el punto A al punto de aplicación de la fuerza F_{ey} (mm).

El peso P se determina al multiplicar la masa del conjunto árbol, mandril y engranaje por la aceleración de caída libre; L_3 en *AutoCAD* por procedimiento geométrico (dibujo horizontal en 3D del conjunto árbol, engrane y mandril, y cálculo de la coordenada del centro de masa); F_{ey} al multiplicar la fuerza tangencial motriz por la tangente del ángulo de presión transversal; L_1 y L_2 por medición. La fuerza radial F_{ey} se determina a partir de los principios fundamentales de las relaciones de fuerza y la geometría estándar de los engranajes helicoidales (Budynas y Keith-Nisbut, 2012), tal como se muestra en la siguiente ecuación 2.

$$F_{ey} = \frac{60 \cdot Np \cdot (Z + 2 \cdot \cos(\psi))}{\pi \cdot n \cdot De \cdot Z} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\psi)} \quad (2)$$

Donde: Np , es la potencia transmitida (W); α es el ángulo de presión normal (grados); Z , cantidad de dientes del engrane; ψ , ángulo de las hélices (grados); n , número de revoluciones (r/min); De , diámetro exterior de la rueda dentada (m).

La determinación precisa de estos parámetros de operación (carga y velocidad de rotación) es fundamental para el diseño tribológico.

La temperatura ideal de funcionamiento de un cojinete es de 50 °C, aunque las altas revoluciones permiten operar a temperaturas mayores. Temperaturas elevadas pueden reducir la eficacia del lubricante, pero si son inducidas o por radiación, se mantiene el servicio seleccionando un aceite con viscosidad apropiada (Rodríguez, 2025).

2.5. Diseño del cojinete de deslizamiento

El material del cojinete se identificó mediante inspección, análisis químico y de dureza, estableciendo que la dureza superficial del árbol debe estar en el rango de 165 a 400 HB (SKF 2025). La configuración y el tamaño se basaron en el buje original y las recomendaciones de SKF (2025), calculando la velocidad de deslizamiento y la carga específica, mediante las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$Vd = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (3)$$

Donde, Vd es la velocidad de deslizamiento, m/s; D diámetro del árbol, mm.

$$Pe = \frac{Ay}{L \cdot D} \quad (4)$$

Donde, Pe es la carga específica que actúa sobre el cojinete, N/mm²; L es la longitud del buje en mm.

El coeficiente de fricción (f) se determinó mediante la metodología de Dobrovolski y Mott (Leyva, 2016), con ligeras adecuaciones al caso específico del cojinete de deslizamiento objeto de estudio (Rodríguez, 2025). Las especificaciones de la interfase siguieron el ajuste F7/e8 (SKF 2025). Se calculó la holgura diametral y radial según Leyva (2022); en dependencia del diámetro, la temperatura, precisión del ajuste y propiedad del material. El acabado superficial se definió utilizando las tablas de Hernández (2010).

Se calculó el espesor mínimo de la película de lubricante, la relación de espesor de película, el número de *Sommerfeld* y el coeficiente de fricción, todos basados en Budynas y Keith-Nisbut (2012), Leyva (2016) y Rodríguez (2025).

2.6. Régimen de lubricación

El régimen de lubricación se define calculando el coeficiente de espesor de la película de lubricante (ecuación 5) y comparándolo con los parámetros de la Tabla 1 (Del Castillo, 2007).

$$\lambda = \frac{h_0}{(Rz1^2 + Rz2^2)^{0,5}} \quad (5)$$

Donde, λ coeficiente de espesor (adimensional); h_0 es el espesor mínimo de la película de lubricante (mm); R_{z1} , rugosidad del agujero (μm); R_{z2} , rugosidad del eje (μm).

Tabla 1. Parámetros de los regímenes de lubricación

Régimen de lubricación	h_0 (μm)	(λ)	(f)
Límite	0,005 – 0,1	< 1	0,03 – 0,4
Mixta	0,01 – 1,0	1 – 3	0,02 – 0,2
Elastohidrodinámica	0,01 – 10	3 – 10	0,01 – 0,1
Hidrodinámica	1 – 100	> 6	0,001 – 0,01

La viscosidad dinámica del lubricante se determina mediante la ecuación 6 (Mott, 2006). La viscosidad dinámica requerida a la temperatura de operación se establece utilizando un gráfico basado en la norma ISO 7902 – 2, 1995 (Leyva, 2016).

$$\mu_e = \frac{S \cdot Pe}{w \cdot \left(\frac{Dm}{2 \cdot Cr}\right)^2} \quad (6)$$

Donde, μ_e es la viscosidad dinámica efectiva del lubricante, MPa·s; S el número de *Sommerfeld*, Pe la carga específica sobre el cojinete de deslizamiento, N/mm²; ω velocidad angular de deslizamiento en la interfase del cojinete y el muñón, rad/s; Dm diámetro del muñón, mm; Cr holgura radial, mm.

2.7. Vida útil del cojinete de deslizamiento

La determinación de la vida útil del cojinete de deslizamiento se efectúa con la ecuación 7 (GMBH, 2015).

$$Lh = \frac{Ka}{Pe \cdot (Vd)^{1,2}} \cdot Fp \cdot Fc \cdot Fd \cdot Fm \quad (7)$$

Donde Lh es la vida del cojinete en horas; Ka constante dependiente del campo de aplicación, Fp factor de corrección de carga; Fc factor de corrección de la temperatura; Fd factor de corrección del tamaño; Fm factor de corrección de material. La constante Ka y los factores de corrección se determinan con arreglo a la tabla de GMBH (2015); la velocidad y la carga específica se determinan a través de las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

2.8. Regímenes de elaboración del cojinete

La definición de los regímenes de elaboración del buje, que incluyen el número de revoluciones, el avance, la profundidad de corte, el número de pasadas y el tiempo de maquinado, se realiza aplicando las ecuaciones de cálculo propuestas por Sandvik (2000).

2.9. Elaboración del resultado de las mediciones

Se fundamentó en asegurar la representatividad, la normalidad y la comparación de los resultados. Esto implicó la realización de réplicas de las mediciones, el establecimiento de límites de tolerancia y la determinación del error relativo (Hernández, 2010; Miller y Freund, 2021).

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros de operación del cojinete de deslizamiento

La evaluación de los parámetros operacionales (velocidad, carga y temperatura) es esencial para la durabilidad del cojinete.

Número de revoluciones: el análisis cinemático del mecanismo (motor eléctrico y reductor de tornillo sin fin/engranaje helicoidal) determinó que el árbol gira a 2 800 r/min.

Cargas: la carga total sobre el cojinete es una combinación del peso del conjunto rotatorio (árbol, rueda, mandril) y la fuerza radial del engranaje (Figura 2); el peso del conjunto es de 6,282 N (con $m = 0,641$ kg; $g = 9,8$ m/s²); y la fuerza radial determinada por la ecuación 2 es de 644,782 N (con $Np = 1\ 000$ W; $Z = 38$; $\psi = 150$; $\alpha = 200$; $n = 2\ 800$ r/min; $De = 0,04$ m). Aplicando la ecuación 1 (con $L1 = 15$ mm, $L2 = 20$ mm, $L3 = 31$ mm) para el equilibrio de momentos, la fuerza radial total sobre el cojinete es de 374,011 N.

Temperatura: aunque 50 °C es ideal (Rodríguez, 2025), la alta velocidad de operación y el calor ambiental sugieren una temperatura de diseño de 60 °C; esta condición exige la elección de un lubricante de viscosidad adecuada para evitar el desgaste prematuro.

3.2. Análisis del diseño del cojinete

La caracterización del material (Tabla 2) y los estándares de *Vulcanometals* (Cáseres, 2019), permitieron identificar el buje desgastado como bronce al aluminio CuAl10Ni (163 HB con desviación típica 7,23 HB) y el nuevo como bronce al estaño fosforoso CuSn14 (232 HB con desviación típica 7,47 HB).

Tabla 2. Composición química del material del buje

Material	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Mn	Al	Si
Bronce CuAl10Ni	79	...	0,03	...	3,5 4,5	4 5	0,8 1,5	8,5 9,5	0,1
Buje desgastado	78	...	0,025	...	3,2	4,4	1,1	9,2	0,08
Bronce CuSn14	86 89	12 14	0,25	0,25	0,15	0,5
Buje nuevo	88	12,5	0,24	0,23	0,16	0,45

La dureza del árbol (278 HB) fue 1,71 veces superior a la del buje desgastado y 1,2 veces superior a la del buje nuevo. El incremento del 42,33 % en la

dureza es el pilar de la estrategia de recuperación, ya que proporciona una resistencia al desgaste significativamente superior. Se confirma que el buje actúa como elemento de sacrificio (SKF 2025). La configuración geométrica (Figura 3) y la temperatura de diseño (60°C) fueron analizadas.

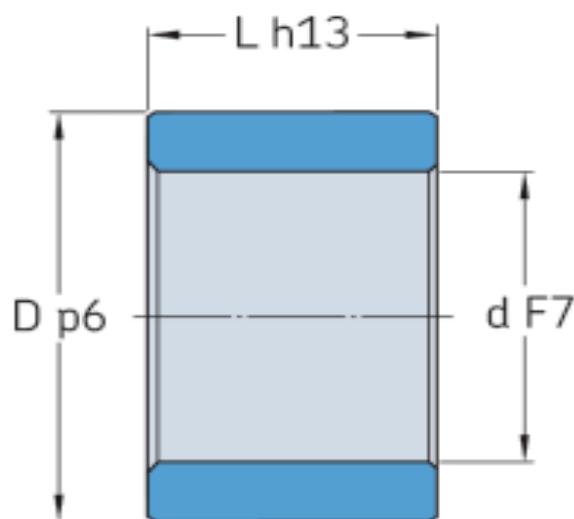


Figura 3. Tolerancias de los cojinetes de fricción rectos de bronce sólido (SKF, 2025).

Se verificó que la velocidad de deslizamiento (Vd) calculada mediante la ecuación 3 es de 0,000 11 m/s menor que 0,01 m/s, y la carga específica (Pe) calculada por ecuación 4 es de 6,68 N/mm² menor que 50 N/mm²; ambos valores están por debajo de los límites recomendados por SKF (2025). Esta validación geométrica y de carga indica que el cojinete está sobredimensionado para las condiciones nominales, lo que minimiza el riesgo de daño o desgaste prematuro y contribuye a garantizar un desempeño seguro y una larga vida útil del componente en el entorno industrial.

Para determinar el coeficiente de rozamiento, se aplicaron metodologías de Dobrovolski y Mott (Rodríguez, 2025). Para una holgura radial (Cr) de 0,020 mm, coeficiente de seguridad (k) 2,5 y tamaño de partículas sólidas en el lubricante (ha) 2,5 μm , el espesor mínimo de la película ($h0$) fue de 0,01 mm, resultando en un número de *Sommerfeld* (S) de 0,18 y un coeficiente de fricción (f) de 0,023. Dado que $0,01 < f < 0,1$, se determina que el cojinete opera (Tabla 1) bajo un régimen de lubricación elastohidrodinámica (Del Castillo, 2007).

3.3. Lubricación del cojinete

Adicionalmente para mayor precisión, la determinación del régimen de lubricación se realizó mediante el cálculo del coeficiente de espesor de la

película (λ), utilizando la ecuación 5 y la Tabla 1. Con un espesor mínimo de película (h_0) de 0,01 mm y rugosidades $Rz1 = Rz2 = 0,8 \mu\text{m}$, se obtuvo $\lambda = 9,06$. Este resultado, al situarse en el rango de 3 a 10, indica un régimen de lubricación elastohidrodinámica (Del Castillo, 2007), asegurando la protección del par cinemático. La consecución de este régimen es la prueba técnica de que el diseño garantiza la separación total de las superficies, lo cual es indispensable para la durabilidad y fiabilidad del buje.

La viscosidad dinámica efectiva requerida se determinó mediante la ecuación 6, considerando el número de *Sommerfeld* ($S = 0,18$), la carga específica ($Pe = 6,68 \text{ N/mm}^2$), la velocidad angular ($\omega = 293,07 \text{ rad/s}$), el diámetro medio ($D_m = 7,003 \text{ mm}$) y la holgura radial ($Cr = 0,02 \text{ mm}$), resultando en 132 MPa·s. Considerando que los aceites derivados del petróleo deben limitarse a 70 °C para retardar la oxidación (Mott 2006), y utilizando la norma ISO 7902 - 2 (1995) para la temperatura de operación de 60 °C, se concluye que el lubricante adecuado es un ISO VG 460.

La selección de este lubricante de alta viscosidad es una medida de ingeniería específica y preventiva para contrarrestar los efectos adversos de la alta velocidad y la temperatura de diseño, asegurando que la película lubricante mantenga su integridad y eficacia en el exigente entorno minero-metalúrgico.

3.4. Estimación de la vida útil del cojinete

La estimación de la vida útil del cojinete (L_h), en horas, se realizó aplicando la ecuación 7 propuesta por GMBH (2015), la cual incorpora factores de corrección específicos. Los factores utilizados fueron: $K_a = 400$ (carga local), $F_p = 1$ (dado que $Pe = 6,68 \text{ N/mm}^2 < 10 \text{ N/mm}^2$), $F_c = 1,6$ (funcionamiento interrumpido), $F_d = 1$ (árbol menor a 20 mm) y $F_m = 0,4$ (bronce). Al sustituir estos valores, junto con la carga radial específica ($Pe = 6,68 \text{ N/mm}^2$) y la velocidad de deslizamiento ($V_d = 0,000 11 \text{ m/s}$), se obtuvo una vida útil estimada de 1 348 000 horas.

Esto contribuye a asegurar la confiabilidad operativa a largo plazo del equipo, lo que se traduce directamente en una reducción de los costos de mantenimiento y una mayor disponibilidad.

3.5. Regímenes de elaboración del cojinete

La definición de los regímenes de elaboración fue crucial para trasladar las especificaciones de diseño (material y acabado superficial) a la realidad productiva, a pesar de las limitaciones de la maquinaria disponible.

La determinación de los regímenes de elaboración se basó en el análisis del diseño del buje de bronce fosfórico (CuSn14), las dimensiones requeridas

según el buje desgastado y las recomendaciones de SKF (2025), detalladas en la Figura 4. El proceso de fabricación se realiza en un torno 16k20 a partir de un semiproducto de 30 mm de largo por 20 mm de diámetro, e incluye operaciones secuenciales de refrentado, cilindrado, taladrado y trozado.

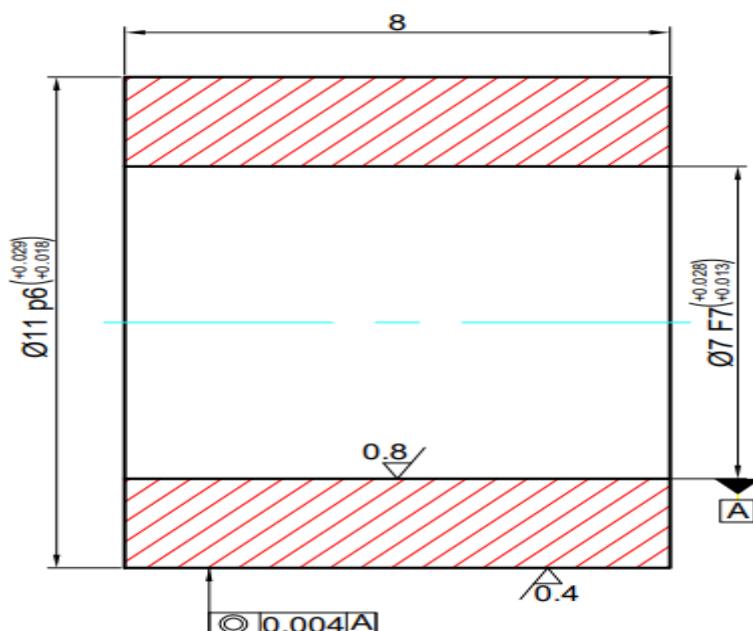


Figura 4. Croquis del cojinete de deslizamiento.

La velocidad de corte (V_c), calculada según Sandvik (2000), reveló una limitación: la velocidad máxima del torno 16k20 (1 600 r/min) impide alcanzar la V_c mínima recomendada (ej., 240 m/min, ajustada por $K_v = 1,09$ para la cuchilla CCMT 09 T3 – 04 WF 3005). Esta restricción provoca la subutilización de las herramientas en todas las operaciones, incluyendo el taladrado (broca R415.5 – 0690 – 30.8C0 1040) y el trozado (cuchilla N123F2 – 0250 – 0001 – CF 4025). Para compensar la baja velocidad de corte y asegurar el acabado superficial, se implementó una estrategia de compensación: el avance (fn) se seleccionó al mínimo de la máquina (0,025 mm/r para refrentado/trozado; 0,05 mm/r para taladrado/cilindrado), basándose en las especificaciones de la máquina y las tablas del fabricante (Sandvik, 2000). La profundidad de corte (t) se estableció en 3 mm, requiriendo una pasada para refrentado y dos pasadas para cilindrado.

El tiempo de maquinado (T_m), calculado mediante la ecuación de Sandvik (2000), sumó un total de 1,125 min (refrentado: 0,4 min; cilindrado: 0,35 min; taladrado: 0,175 min; trozado: 0,2 min). Aunque el tiempo total es corto, la subutilización de las herramientas debido a las limitaciones de velocidad del torno 16k20 sugiere que la selección de un equipo con mayor capacidad optimizaría la eficiencia del proceso, no obstante, en el momento

de efectuar la construcción del cojinete de deslizamiento no se disponía de otro torno.

Este proceso de fabricación, basado en el plano de la pieza y descrito en la carta tecnológica (Rodríguez 2025), es una prueba de la capacidad de la ingeniería para resolver la escasez de piezas de repuesto mediante la adaptación de recursos existentes, un factor clave para la autosuficiencia tecnológica en la industria minero-metalúrgica.

3.6. Control de los parámetros constructivos del buje

El control de calidad es la etapa que vincula el diseño teórico con la funcionalidad práctica, asegurando que el cojinete fabricado cumpla con las especificaciones dimensionales y superficiales críticas para operar bajo el régimen de lubricación EHL.

El control de calidad se enfocó en la verificación de las dimensiones y las propiedades superficiales del buje para asegurar la correspondencia con las especificaciones de diseño. Para el acabado superficial, se utilizó un diagrama de control de procesos basado en las mediciones de rugosidad superficial (R_a), como se ilustra en la Figura 5, $LST(R)$ y $LIT(R)$ son los límites de tolerancia determinados según Hernández (2010); Miller y Freud (2021). Este diagrama, con un nivel de confianza del 95 %, confirmó que el proceso se mantuvo bajo control estadístico.

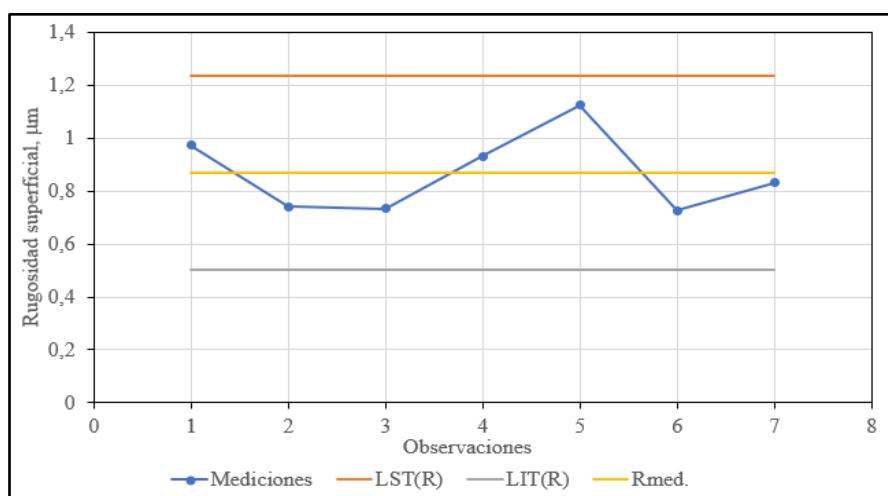


Figura 5. Diagrama de control de las mediciones de rugosidad superficial en R_a .

La rugosidad promedio obtenida en la superficie interior del buje fue de 0,88 μm . Para comparar este valor con la rugosidad especificada en el diseño (0,8 μm), se calculó un error relativo del 10 %. Este resultado es fundamental, ya que valida la estrategia de mecanizado compensatorio aplicada ante las limitaciones del torno 16k20. Un error relativo bajo

garantiza la calidad del acabado superficial requerido para el correcto desarrollo de la película lubricante.

La confirmación de que la rugosidad superficial se ajusta al diseño es crucial para la activación efectiva del régimen de lubricación elastohidrodinámica. Este control de los parámetros constructivos asegura que el buje no solo tiene la dureza y el material correctos, sino también el acabado superficial necesario para garantizar la alta durabilidad y confiabilidad del equipo de la industria minero-metalúrgica. Adicionalmente, se verificó que los diámetros interior y exterior, junto con la longitud del buje, cumplieran con los límites dimensionales establecidos.

4. CONCLUSIONES

- El estudio de diseño, fabricación y evaluación del cojinete de deslizamiento permite la recuperación efectiva de equipos para la continuidad de los procesos en la industria minero-metalúrgica del níquel.
- Se identifica que el buje desgastado estaba compuesto por bronce al aluminio (CuAl10Ni), mientras que el buje de reemplazo se fabricó con bronce al estaño fosforoso (CuSn14). La dureza promedio del nuevo cojinete de deslizamiento (232 HB) es 42,33 % superior a la del componente desgastado (163 HB), lo que confiere una mayor resistencia al desgaste.
- La selección del lubricante ISO VG 460 para una temperatura de diseño de 60 °C, carga radial de 374,011 N y velocidad de rotación de 2 800 r/min en el cojinete es crucial para el mantenimiento de la película hidrodinámica, lo que se traduce en una vida útil estimada de 1 348 000 horas.
- La rugosidad superficial obtenida en la superficie interior del buje se ajusta a la especificación de diseño con un error relativo de solo el 10 %, demostrando la capacidad de la ingeniería local para resolver la escasez de piezas de repuesto y mantener la operatividad de equipos críticos en el sector minero-metalúrgico.

5. REFERENCIAS

Budynas, R. C. y Keith-Nisbut, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica*. 9na edición. New York: McGraw-Hill, 1029 p.
<http://www1.frm.utn.edu.ar.>

Carrión, A. G.; Aldas, D.; Lascano, N. y Ayala, M. (2024). La sostenibilidad ambiental en la industria manufacturera del Ecuador. Un estudio desde

- las fuentes energéticas. *Revista Ciencia UNEMI*, 17(44), 148-161.
<https://doi.org/10.29076/issn.25287737vol17iss44.2024pp148-161p>.
- Cáseres, A. A. (2019). *Cobre - Bronce, latón - babbitt*. Vulcanometals, Lima, 24 p. Consultado 23 de junio de 2025, en: wwwvulcanometals.com.
- Del Castillo, F. D. (2007). *Tribología: fricción, desgaste y lubricación*. Izcalli, Cuautitlán, 25 p. <http://profefelipe.next>.
- Dimitri, A. S.; Rashed, N. A.; Hegazi, H. A. and EL-Shazly, M. H. (2025). Design optimization of multipoles radial magnetic bearings for large industrial rotors. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(108), 2-8. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00678-w>.
- García, A.; Echevarría, D.; Triana, J. A.; Triana, J. P.; Cruz, K. y González, R. (2024). Reporte sobre economía cubana enero-julio 2024. Centro de estudio de economía cubana. <https://library.fes.de>.
- García, A. E.; González, G.; Aguilera, C. D; De la Torre, F. y Abreu, O. (2022). Evaluación de cojinetes de deslizamiento basada en la norma ISO 7902:2020. *Revista Ingeniería Mecánica*, 25(2), 1-8.
<https://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.
- García, A. E.; Penabad, L.; Aguilera, C. D.; Barrera, C. y Guillén, J. (2023). Modelo para la gestión de la lubricación y los lubricantes en la industria. *Ingeniería Mecánica*, 26(3), 1-9.
<http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.
- Harishkumar, K.; Chandrakant, R. and Satish, Sh. (2023). Effect of Cavitation and Temperature on Fluid Film Bearing Using CFD and FSI Technique: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 1623-1636. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09847-z>.
- Hernández, F. D. (2010). *Metrología dimensional*. 2da edición. Ciudad Habana: Félix Varela, 507 p. <https://isbncuba.ccl.cerlalc.org>.
- Jacobs, G. and Baszenski, Th. (2024). Detection of wear in sliding bearings with the use of machine learning techniques. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 18-28. [DOI: 10.24053/TuS-2023-0036](https://doi.org/10.24053/TuS-2023-0036).
- Kofi, R.; Yeboah, E.; Yeboah, E.; Agyapong, G. and Efua, S. (2023). Sustainable manufacturing practices and sustainable performance: Evidence from Ghana's food manufacturing sector. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 9, 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.clsn.2023.100120>.
- Kumar, R. (2022). Effect of tool wear on surface roughness in machining of AA7075/ 10 wt.% SiC composite. *Composites Part C: Open Access*, 1-19. <http://www.sciencedirect.com/journal/composites-part-c-open-access>.
- Lehmann, B.; Trompetter, P.; Gutiérrez, F. and Jacobs, G. (2023). Evaluation of Wear Models for the Wear Calculation of Journal Bearings for Planetary Gears in Wind Turbines. *Revista lubricants*, 11(364), 1-18.
<https://doi.org/10.3390/lubricants11090364>.

- Leyva, B. (2022). *Guía para clases prácticas de mediciones técnicas: Orientaciones y sistemas de ejercicios*. Editorial Académica Española, 104 p. <https://www.amazon.ie>.
- Leyva, A. (2016). *Análisis de cojinetes radiales de contacto deslizante de los ventiladores de tiro forzado de la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez*. Amaury Gilbert Hernández e Isnel Rodríguez González (Tutores). (Tesis de ingeniería mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa). 77 p. <https://nинive.ismm.edu.cu>.
- Michalec, M.; Svoboda, P.; Krupka, I. and Hartl, M. (2021). A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems. *Revista Engineering Science and Technology, an International Journal*, 936-958. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.010>.
- Miller, I. y Freund, J. E. (2021): *Probabilidad y estadística para ingeniero*. 4ta edición. Editorial Reverté, Barcelona, 403 p. <https://api.pageplace.de>.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. 4ta edición. Ciudad de México: Pearson Educación, 628 p. <https://www.udocz.com>.
- Muñoz, P.; Villena, O.; Mayorga, L.; Pérez, D. y Moya, D. (2024). Predicción de desgaste abrasivo y dureza superficial de partes impresas por tecnología SLA. *Revista Ingenius*, 31, 19-38. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.02>.
- Prasad, A., Kumar, A. and Gajrani, K. (2022). *Advances in Sustainable Machining and Manufacturing Processes*. Editorial Taylor y Francis Group. ISBN: 978-1-032-08165-6. [DOI: 10.1201/9781003284574](https://doi.org/10.1201/9781003284574).
- Ramírez, F. (2023). Modelos de desgaste de herramientas: Sobre la hipótesis de modelización. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 31(9), 1-14. <https://orcid.org/0000-0002-2156-7263>.
- Rising, J. A.; Taylor, Ch., Ives, M. C. and Ward, R. (2022). Challenges and innovations in the economic evaluation of the risks of climate change. *Ecological Economics*, 197, 1-13. <http://www.elsevier.com/locate/ecocon>.
- Rodríguez, C. M. (2025). *Evaluación y construcción de un cojinete de deslizamiento para taladro portátil ID13-HYL1135*. Benigno Leyva De la cruz y Eli Efraín Guzmán Romero (Tutores). (Tesis de grado, Universidad de Moa). 71 p. <https://nинive.ismm.edu.cu>.
- Sandvik. (2000). *Torneado, fresado y taladrado*. 6ta edición. Suecia: Sandvik Coromant, 217 p. www.coromant.sandvik.com.
- Santos, B. L. (2025). Cadenas de suministro sostenibles en la industria manufacturera: innovación, conocimiento y gestión lean. *Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, 27(3), 867-876. [www.doi.org/10.36390/telos273.07](https://doi.org/10.36390/telos273.07).
- SKF. (2025). Diseño y versiones de cojinetes de deslizamiento SKF. Consultado: 14/06/2025. Disponible en:

<https://www.skf.com/ar/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-stripes/bushings/designs-variants>.

TTV, GmbH. (2015). Cojinetes deslizantes - información técnica.

Consultado: 18/06/2025. Disponible en:

<https://www.ttvgmbh.de/pdf/Gleitlager/Technische-Infos>.

Wang, L.; Han, J.; Tang, Z.; Zhang, Y., Wang, Y. and Li, X. (2025).

Geometric Accuracy Design of High-Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(87), 2-35. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y>.

Información adicional

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

BLDC: diseño de la investigación, realización de mediciones, procesamiento e interpretación de los resultados, redacción del manuscrito original, corrección y aprobación del informe final.
EEGR: diseño de la investigación, revisión del manuscrito original, análisis de resultados, aprobación del informe final. MFSC: análisis bibliográfico y de resultados, revisión y aprobación del informe final. HLLA: revisión bibliográfica, análisis de resultados, revisión y aprobación del informe final. WGQS: búsqueda bibliográfica, metodología, análisis de resultados y aprobación del informe final. YRM: diseño de la investigación, gestión bibliográfica, elaboración y revisión del manuscrito original, análisis de resultados, corrección y aprobación del informe final.

ORCID

BLDC, <https://orcid.org/0009-0004-9080-1406>

EEGR, <https://orcid.org/0000-0003-4906-8009>

MFSC, <https://orcid.org/0000-0003-1785-1568>

HLLA, <https://orcid.org/0000-0003-2688-015X>

WGQS, <https://orcid.org/0000-0001-9430-2082>

YRM, <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>

Recibido:30/10/2025

Aceptado:15/11/2025